

МАССОПЕРЕНОС МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ МАГНИТОИЗОЛИРОВАННОГО ДИОДА, РАБОТАЮЩЕГО В ДВУХИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

С.К. Павлов¹⁾, А.Е. Лигачев²⁾, Г.В. Потемкин¹⁾, Г.Е. Ремнев¹⁾

¹⁾ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ИФВТ, лаб. № 1,634028,

пр. Ленина, 2а, к. 11, Томск, Россия, er.gvp@yandex.ru

²⁾Институт общей физики имени А.Н. Прохорова РАН,
ул. Вавилова, 38, Москва, Россия, carbin@yandex.ru

С помощью элементного микроанализа поверхности потенциального графитового электрода технологического ускорителя мощных пучков ионов углерода установлен перенос материала между электродами магнитоизолированного диода, работающего в двухимпульсном режиме - от заземленного электрода из нержавеющей стали на поверхность потенциального графитового электрода, влияющий на элементный состав ионного пучка.

Введение

Для формирования эффективных защитных покрытий на изделиях из металлов и сплавов и многих конструкционных материалов могут быть использованы несепарированные ионные пучки, как стационарные, так и импульсные при условии, что они не содержат примесей, снижающих эксплуатационные свойства модифицируемого слоя [1-3]. Определение оптимальных режимов работы и конструкции ускоряющего зазора является серьезной задачей при разработке технологических установок, генерирующих мощные ионные пучки МИП. Одним из факторов, оказывающим существенное влияние на свойства обрабатываемой поверхности, является междуэлектродный массоперенос в магнитоизолированном диоде.

Перенос материалов между электродами при импульсных пробоях вакуумного зазора детально изучался многими исследователями [1] в связи с разработкой электронных устройств и ускорительной техники. В последнем случае одной из важных проблем является получение в анод-катодном (А-К) зазоре плотной парогазовой плазмы, позволяющей формировать мощные пучки не газовых ионов наносекундной длительности [1-3]. Для установок, генерирующих мощные пучки ионов МИП металлов или углерода, типичной является конструкция электродов, в которой потенциальный электрод соответствующей конфигурации (в плоской или фокусирующей геометрии) выполнен из материала, ионы которого необходимо получить, а заземленный (К) изготовлен из жаропрочного сплава, с низким давлением насыщенных паров и максимально стойкого к распылению его поверхности [2, 3].

Основная часть

Для получения МИП из углеродной плазмы в [3] было успешно использовано явление взрывной эмиссии [2] и применен двухимпульсный режим работы магнитоизолированного диода. Интерес к ионам углерода обусловлен возможностью получения карбидосодержащих защитных слоев на поверхности обрабатываемых изделий из металлических материалов, а также электрофизическими свойствами графита [3] и его необычно высоким давлением насыщенных паров.

На рис. 1 схематично представлена конструкция зазора магнитоизолированного диода ТЕМП-4М с изогнутым потенциальным электродом – 1, изготовленного из реакторного графита [3] с пористостью до 30% и заземленным – 2, выполненным в виде изогнутой решетки с прорезями шириной 4 мм и прозрачностью 60%, из нержавеющей стали 12Х18Н10Т [2].

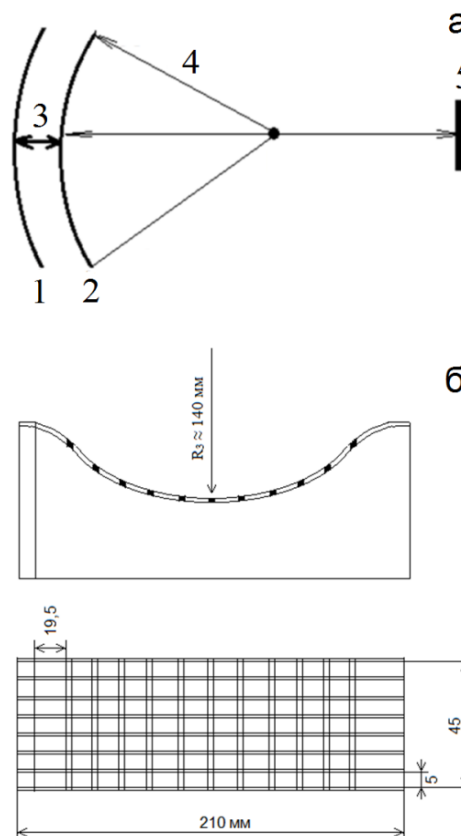


Рис. 1. а) Схема устройства формирования МИП. 1 - потенциальный электрод, 2 - заземленный электрод, 3 - межэлектродное расстояние, 4 - фокусное расстояние, 5 - мишень. б) геометрия заземленного электрода, выполненного из нержавеющей стали.

Эта конструкция, уменьшающая расходимость формируемого потока заряженных частиц, отличается простотой в эксплуатации, высокой износостойкостью и хорошей воспроизводимостью геометрии диода при переборке. На опытно-технологической установке ТЕМП-4М [2] с энергией однозарядных ионов 250–300 кэВ, работающей в двухимпульсном режиме были проведены исследования влияния переноса материала заземленного электрода на свойства формируемого пучка ионов углерода. Типичная осциллограмма ускоряющего напряжения и полного тока диода представлена на рис. 2.

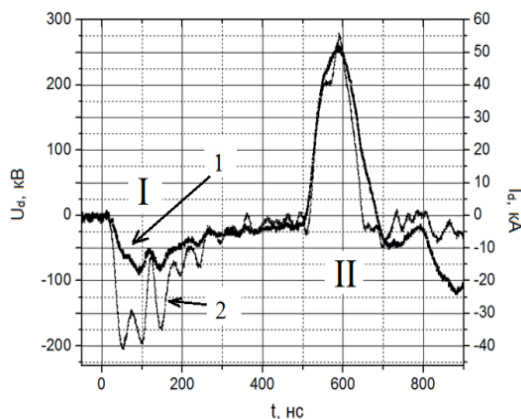


Рис. 2. Типичная осциллограмма напряжения и полного тока диода. 1 - напряжение, 2 - полный ток; I - плазмообразующий импульс, II - ускоряющий импульс.

Плазмообразующий отрицательный импульс на графитовом потенциальном электроде имел параметры - ($t \approx 300$ нс, $U \approx 200$ кВ), а второй - положительный - ($t \approx 100$ нс, $U \approx 250$ кВ) ускорял однозарядные ионы углерода до энергии 250 кэВ. Установочная плотность ионного тока, определяемая зазором - 3 и расстоянием между мишенью и заземленным электродом - 4, находилась в диапазоне 30–300 А/см². Полный ток диода измерялся поясом Роговского с обратным витком. Оценка плотности потока ионов, извлекаемого вторым импульсом, производилась с помощью коллимированного цилиндра Фарадея с магнитной отсечкой. При импульсном воздействии на графитовый электрод интенсивных потоков направленной энергии над его поверхностью создается пылевая плазма (неидеальная плазма с конденсированной дисперсной фазой). Свойства графитовой плазмы, образующейся в подобных случаях, изучены менее детально, чем для металлов, и ее поведение существенно отличается от спокойной холодной плазмы, описанной Лэнгмюром [4]. Температура плавления графита составляет 4800 К, а реализовать плавление можно, лишь достигнув давления в камере ~ 100 бар. В вакууме при высоких температурах, особенно выше 2000 К, графит усиленно сублимирует [5]. Параллельные слои графита между собой связаны слабо, что является причиной «отщепления» молекул, кластеров и даже макрочастиц в процессе образования МИП ионов углерода.

По данным [5] при температуре 4979 К, достигнутой высокоскоростным нагревом графита

пучком лазера парциальные давления частиц, определенные с помощью масс-спектрометра составляли: для $C_1 - 41.3$ бар, $C_2 - 9.4$ бар, $C_3 - 49.5$ бар, $C_5 - 0.23$ бар, $C_7 - 0.15$ бар, а суммарное давление сублимата - 100 бар, без учета присутствующих при высокоскоростной сублимации графита в вакууме кластеров и фрагментов [6].

Высокая объемная плотность неравновесной сублимационной углеродной плазмы, создаваемая первым высоковольтным импульсом, позволяет формировать импульсные потоки заряженных частиц плотностью до $10^{13} - 10^{15}$ ион/см².

Следующий, теперь положительный, импульс (рис. 2, II) на потенциальном электроде заставляет положительно заряженные частицы углеродно-пылевой плазмы двигаться в направлении заземленного электрода из нержавеющей стали. Часть потока частиц углерода (примерно 40%) с плотностью мощности, превосходящей критическую (для зазора = 8.5 мм), падает на решетку из нержавеющей стали и образует вторичную парогазовую плазму, в которой присутствуют все ионы и нейтралы химических элементов, входящих в состав нержавеющей стали.

Время существования на поверхности заземленного электрода участков с температурой, при которой скорость испарения сравнима со скоростью испарения во время соударения с потоком углеродных частиц, превышает длительность второго импульса в 2-3 раза [7]. Таким образом, после каждого импульса на поверхности графитового электрода из вторичной парогазовой плазмы осаждаются отрицательно заряженные частицы и нейтралы элементов, содержащихся в нержавеющей стали.

Для оценки изменения состава поверхностного слоя графитового электрода, проработавшего около 2-х лет, были выпилены два образца: первый из рабочей поверхности, а второй из его внутренней части.

Состав (вес. %) поверхностного слоя образцов определялся с помощью энергодисперсионного детектора растрового электронного микроскопа Quanta 600. На рис. 3. представлены типовые данные элементного состава рабочей поверхности потенциального графитового электрода после двухлетней эксплуатации. Микроанализ образца, выпиленного из внутренней части потенциального электрода, показал, что в нем, кроме углерода, содержится значительное количество кислорода - 22%, по видимому, в виде соединения СО в порах.

В таблице 1 проведено сравнение состава рабочей поверхности графитового электрода с составом нержавеющей стали, из которой выполнен заземленный электрод.

Процессы образования взрывоэмиссионной плазмы на потенциальном электроде должны были бы приводить к удалению с его поверхности компонент осажденного вещества заземленного электрода каждым последующим импульсом. Однако вместо этого происходит накопление материала элементов заземленного электрода на рабочей поверхности графитового электрода и, как следствие, изменение состава потока частиц, идущих на облучаемый образец или деталь.

Аномальным фактом является очень высокая скорость обогащения поверхности графита медью.

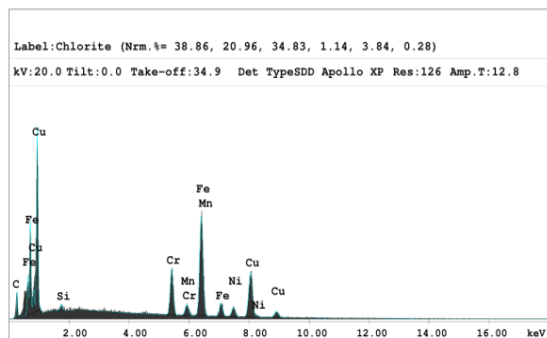


Рис. 3. Результаты энергодисперсионного анализа поверхности потенциального электрода.

Таблица 1. Поверхностный состав электродов.

Образец мат. вес. %	Заземленный электрод (нерж. сталь)	Поверхность гра- фитового электрода, после экс- плуатации
C	0.12	3
Cr	17-19	12
Fe	60-64	39
Mn	2	2
Ni	9-11	6
P	0.03	-
S	0.02	-
Si	0.8	1
Ti	0.5-0.8	-
Cu	0.3	37

Обработка поверхности деталей углеродным ионным пучком, содержащим примеси Cr, Fe, Ni, Ti, Cu, Mn, может приводить к непрогнозируемым характеристикам модифицируемого слоя образца или детали.

Заключение

Данные проведенных исследований указывают на целесообразность замены материала заземленного электрода из нержавеющей стали на графит или чистый металл (Mo, W), так как при использовании технологического ускорителя для обработки деталей, элементный состав поверхности потенциального электрода влияет на состав ионного пучка и, как следствие, свойства модифицируемого слоя.

В противном случае необходима систематическая чистка поверхности потенциального графитового электрода.

Список литературы

1. Месяц Г.А. Взрывная электронная эмиссия. М.: Физматлит, 2011. 280 с.
2. Лигачев Е.И., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 22. С. 1404-1406.
3. Isakov I.F., Kolodii V.N., Opekunov M.S., et. all // Vacuum. 1991. Vol. 42, № 1/2. P.159-162.
4. Фортков В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматкнига, 2004. 528 с.
5. Савватимский А.И. Плавление графита и свойства жидкого углерода. М.: Физматкнига. 2014. 257 с.
6. Von Helden G., Ming-The Hsu, Gottsetal N. // J. Phys. Chem. 1993. № 97. P. 8182-8192.
7. Лейви А.Я., Шулов В.А., Майер А.Е., Яловец А.П. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. №11. С. 22-33.

MASS TRANSFER BETWEEN ELECTRODES OF A MAGNETICALLY INSULATED DIODE OPERATED IN TWO PULSE MODE

S. Pavlov¹, A. Ligachev², G. Potyomkin¹, G. Remnev¹

¹Tomsk Polytechnic University, lab. #1,

Lenina ave., 2a, Tomsk, 634028, Russia, ep.gvp@yandex.ru

²A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Vavilova, 38, Moscow, Russia, carbin@yandex.ru

Investigations of the surface of a potential graphite electrode of the technology source of high-intensive beams of ions of carbon by elemental microanalysis are presented. It is established that there is transfer of material between the electrodes magnetically insulated diode operating in double-pulse mode - of the ground electrode made of stainless steel to the surface of the potential graphite electrode, which affects on the elemental composition of the ion beam.